

Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 10. 69–77
Лавринович В.А., Убиенных Б.И., Кладько А.А. Коммутационные испытания экспериментального вакуумного выключателя

УДК 621.316.542.9

КОММУТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Лавринович Валерий Александрович¹,
lavrhome@mail.ru

Убиенных Борис Иннокентьевич¹,
boinnu@rambler.ru.

Кладько Андрей Александрович¹,
andkladd@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена активно происходящим техническим перевооружением электрических сетей среднего класса напряжения на предприятиях нефтегазового комплекса Российской Федерации. Высокая эксплуатационная надежность, экологичность применения и простота обслуживания делают вакуумный выключатель наиболее предпочтительным коммутационным аппаратом для производственных условий, присущих предприятиям добывающей отрасли. Как и любое другое промышленное оборудование, вакуумный выключатель должен удовлетворять ряду характеристик, контролируемых как на этапе предэксплуатационных испытаний, так и в процессе эксплуатации. В связи с этим предварительные испытания на коммутационную способность опытных образцов вакуумных выключателей в процессе их разработки являются не только актуальной, но и необходимой задачей.

Цель работы: определение коммутационных характеристик экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в составе высоковольтного вакуумного выключателя с номинальным напряжением 10 кВ.

Методы исследования. Для определения коммутационных характеристик исследуемого высоковольтного вакуумного выключателя была использована синтетическая схема испытаний по Вейлю–Добке, формирующая на испытуемом объекте ток короткого замыкания в диапазоне от 1 до 10 кА и переходное восстанавливающееся напряжение на контактах вакуумной камеры вплоть до 20 кВ.

Результаты. Исследована отключающая способность экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в составе вакуумного выключателя для диапазона токов короткого замыкания 1...10 кА. Установлено, что экспериментальные вакуумные дугогасительные камеры успешно отключают ток до 18,3 кА при переходном восстанавливающемся напряжении 0,85 кВ, но при этом они непригодны для коммутации сетей с номинальным током отключения 10 кА при переходном восстанавливающемся напряжении, характерном для выключателей класса напряжения 10 кВ. Показано, что для использования исследованных экспериментальных вакуумных дугогасительных камер в сетях напряжения классом 10 кВ необходимо последовательное включение двух вакуумных дугогасительных камер в каждом из полюсов вакуумного выключателя.

Ключевые слова:

Вакуумный выключатель, коммутационные характеристики, синтетическая схема, вакуумная дугогасительная камера, испытания.

Актуальность

Высокие требования к эксплуатационной надежности, простоте и безопасности обслуживания оборудования нефтегазовых промыслов предъявляют широкий ряд условий, которым должно удовлетворять коммутационное электрооборудование [1–2]. В частности, основными требованиями к коммутационным электрическим аппаратам будут: надежность работы, высокий коммутационный ресурс, простота обслуживания, экологичность и пожаробезопасность. Всем этим требованиям удовлетворяют два типа конкурирующих между собой высоковольтных выключателей: вакуумные и элегазовые [3–6]. Как показывает практика, элегазовые выключатели не в полной мере удовлетворяют условиям работы в арктических районах, где сконцентрированы основные производственные мощности нефтегазодобывающих предприятий России, что связано с замерзанием элегаза в условиях низких

температур [7]. Оценивая перспективы дальнейшего технического перевооружения электрических сетей в районах Крайнего Севера, можно сделать предположение о том, что в ближайшие десятилетия вакуумные выключатели (ВВ) займут там доминирующее положение во всех классах напряжения.

В связи с этим становится актуальной задача экспериментального определения коммутационных параметров дугогасительных камер вакуумных выключателей как основных эксплуатационных параметров этих аппаратов [8]. На первоначальном этапе контроля параметров вакуумного выключателя коммутационные характеристики определяются в лабораторных условиях путем испытания выключателя, например, на установках по схеме Вейля–Добке [9], формирующей на испытуемой вакуумной дугогасительной камере (ВДК) ток короткого замыкания (КЗ) и переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН).

Объект исследования

Объектом настоящего исследования явилась экспериментальная ВДК в составе вакуумного выключателя типа ВВТ-10-20, предназначенного для коммутации электрических цепей среднего класса напряжений в трехфазных сетях переменного тока промышленной частоты с изолированной нейтралью. Заявленные производителем технические характеристики выключателя сведены в табл. 1. Необходимо отметить, что сопроводительная документация на экспериментальные ВДК (рис. 1) содержала только сведения об испытательном напряжении (42 кВ) и ходе контактов (8+2 мм).

Таблица 1. Основные коммутационные характеристики выключателя ВВТ-10-20

Table 1. Principle switching characteristics of the vacuum circuit breaker VVT-10-20

| Параметр Parameter | Значение Value |
|---|-------------------|
| Номинальное напряжение, кВ Rated voltage, kV | 10 |
| Номинальный ток, А Rated current, A | 630 |
| Номинальный ток отключения, кА Rated breaking current, kA | 20 |
| Собственное время отключения, с Opening time, s | 0,03 |
| Полное время отключения, с Break time, s | 0,05 |
| Одноминутное испытательное напряжение промышленной частоты, кВ One-minute test voltage of industrial frequency, kV | 42 |
| Ресурс по коммутационной стойкости без замены ВДК при номинальном токе, циклов «Включение–Отключение» Resource for switching resistance without changing the vacuum interrupter at rated current, of «Enable–Disable» cycles | 50000 |
| Циклы «Включение–Токовая пауза–Отключение» «Enable–Current Pause–Disable» cycles | 100 |
| Количество циклов «Включение–Отключение» при номинальном токе отключения Number of «Enable–Disable» cycles at rated breaking current | 100 |
| Ход подвижного контакта, мм Movable contact movement, mm | 8+2 |
| Допустимый износ контактов, мм Permissible contact wear, mm | 2 |
| Электрическое сопротивление полюсов главной цепи, мкОм Electrical resistance of the main circuit poles, microhm | 100 |

Одна из экспериментальных ВДК была вскрыта. Внешний вид ее узлов и деталей говорит о высоком уровне вакуумно-технологической обработки. В камере используются плоские торцевые контакты. Контактный материал, предположительно, представляет собой медь-хромовую композицию. В контактно-экранной системе присутствуют под-

ковообразные полюса 3, характерные для создания продольного магнитного поля за счёт тока отключения [10–12].

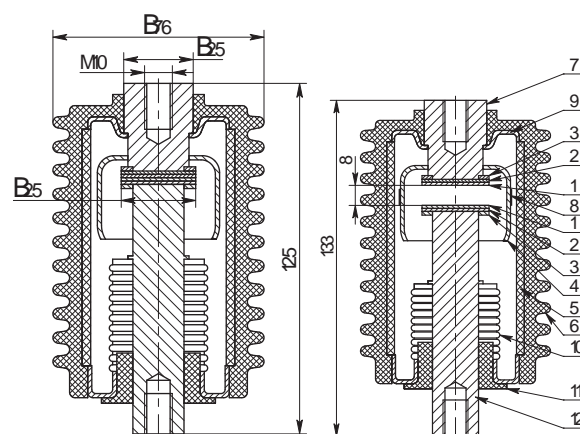


Рис. 1. Экспериментальная вакуумная дугогасительная камера: 1 – контактная площадка; 2 – подложка; 3 – полюс; 4 – ферромагнитный экран; 5 – керамический изолятор; 6 – силиконовый изолятор; 7 – неподвижный контакт; 8 – газопоглотитель; 9 – фланец; 10 – сильфон; 11 – направляющая втулка; 12 – подвижный контакт

Fig. 1. Experimental vacuum interrupter: 1 is the contact plate; 2 is the substrate; 3 is the pole; 4 is the ferromagnetic screen; 5 is the ceramic insulator; 6 is the silicone insulator; 7 is the fixed contact; 8 is the getter; 9 is the flange; 10 is the bellows; 11 is the directing plug; 12 is the movable contact

Ввиду отсутствия в технической документации на ВДК ряда ключевых параметров, решение о режимах испытания было принято на основе сопоставления геометрических размеров исследуемых ВДК, таких как диаметры подвижного и неподвижного токовыводов, габаритные размеры ВДК, с размерами ВДК, параметры которых известны [13–14]. Диаметр контактов экспериментальной ВДК – 25 мм. Торцевые контакты аналогичных размеров без продольного магнитного поля способны отключать максимальный диффузный ток дуги 10 кА. Исходя из этих соображений, были приняты следующие параметры ВДК:

- 1) рабочее напряжение – 10 кВ;
- 2) наибольшее допустимое напряжение – 12 кВ (действующее значение);
- 3) ток отключения – 10 кА (действующее значение);
- 4) номинальный ток – 630 А (действующее значение).

Особенность конструкции данной ВДК – наличие ферромагнитного экрана 4, обладающего низкими теплопроводными свойствами, гальванически связанного с неподвижным контактом 7. Эти оба фактора: низкая теплопроводность и гальваническая связь экрана с контактом ВДК, снижают отключающую способность [15].

Другая особенность конструкции – соизмеримость расстояния между разведёнными контактами с расстоянием между боковой поверхностью контакта и экраном. Такая конфигурация создаёт

условия для возникновения дуг между экраном и контактом, причем это расстояние уменьшается по мере увеличения хода контактов ВДК, а в случае колебаний подвижного контакта при отключении может стать минимальным [15].

Конструктивно выключатель состоит из трех экспериментальных ВДК (по одной в каждом из полюсов выключателя), приводного механизма и устройства управления. Внутри ВДК расположены два контакта – подвижный 12 и неподвижный 7. Во включенном состоянии выключателя пружинный механизм обеспечивает плотное поджатие контактов друг к другу. При отключении тока контакты механически раздвигаются со скоростью 1 м/с. При плавлении контактов в последней точке их касания образуются пары металла, способствующие возникновению электрической дуги, которая горит до тех пор, пока ток в цепи не перейдет через ноль [16–19].

Из расплавленного металла вытягивается тонкий проводник, электрически связывающий контакты. Вследствие локального перегрева проводника, при протекании по нему тока огромной плотности, он взрывается, заполняя пространство между контактами микрокаплями металла, создающими среду, через которую и происходит замыкание тока, при этом напряжение между контактами составляет лишь несколько процентов от номинальной величины напряжения выключателя [16].

После погасания дуги между контактами восстанавливается высокое напряжение, при этом остаточный ток в выключателе отсутствует, что дает возможность применять для испытания отключающей способности выключателя два источника питания, синхронизированных между собой: источник большого тока малого напряжения и источник высокого напряжения малого тока. Это обстоятельство положено в основу реализации синтетических испытаний [9].

Описание установки

Для проведения синтетических испытаний в Энергетическом институте Томского политехнического университета создан испытательный стенд, реализующий схему Вейля–Добке (рис. 2), включающую в себя два синхронизированных электрических контура [20]. Первый – силовоточный контур генератора импульсных токов (ГИТ), в котором создается ток КЗ, второй – высоковольтный контур генератора импульсных напряжений (ГИН), в котором формируется ПВН. Параметры контуров ГИН и ГИТ сведены в табл. 2.

Исходное состояние схемы: конденсаторные батареи $C_{\text{гит}}$, $C_{\text{гин}}$ – заряжены; контакты ВДК 1 – разомкнуты; ВДК 2, 3 – замкнуты.

Для начала испытаний необходимо подать команду на замыкание контактов коммутационной ВДК 1. После их замыкания происходит разряд батареи $C_{\text{гит}}$ и через испытуемую ВДК 3 начинает протекать ток промышленной частоты I_2 . По исте-

чении 0,5 миллисекунд контакты испытуемой ВДК 3 размыкаются, инициируя электрический разряд в межконтактном промежутке. Синхронно с контактами испытуемой ВДК 3 размыкаются контакты защитной ВДК 2, между которыми также возникает электрический разряд.

Таблица 2. Технические характеристики стенда синтетических испытаний

Table 2. Specification of synthetic test facility

| Параметр Parameter | Значение Value |
|---|-------------------|
| Напряжение питания, В Supply voltage, V | 220/380 |
| Максимальная потребляемая мощность, кВт Maximum power consumption, kW | 6 |
| Максимальное используемое статическое напряжение, кВ Maximum static voltage used, kV | 35 |
| Емкость конденсаторной батареи ГИТ, мФ Capacity of the capacitor bank of the pulse currents generator (PCG), mF | 75 |
| Максимальное зарядное напряжение конденсаторной батареи ГИТ, кВ Maximum charge voltage of the capacitor bank of the PCG, kV | 3 |
| Максимальный импульсный ток ГИТ, кА PCG maximum pulse current, kA | 50 |
| Длительность импульса ГИТ, мс PCG pulse duration, ms | 10 |
| Емкость конденсаторной батареи ГИН, мкФ Capacity of the capacitor bank of the pulse voltage generator (PVG), mF | 12–48 |
| Максимальное зарядное напряжение конденсаторной батареи ГИН, кВ Maximum charge voltage of the capacitor bank of the PVG, kV | 35 |
| Максимальный импульсный ток ГИН, кА PVG maximum pulse current, kA | 5 |
| Длительность импульса ГИН, мс PVG pulse duration, ms | 1 |
| Максимальное импульсное напряжение ГИН, кВ PCG maximum pulse voltage, kV | 41 |
| Максимальное рабочее давление воздуха/азота в пневмосистеме, атм Maximum operating pressure of air/nitrogen in the pneumatic system, atm | 5 |
| Напряжение питания магниторазрядного насоса, кВ Supply voltage of magnetic-discharge pump, kV | 7 |
| Максимальный ток магниторазрядного насоса, А Maximum current of magnetic-discharge pump, A | 0,5 |
| Требуемый уровень давления остаточных газов, Торр Required level of residual gas pressure, torr | $\leq 10^{-6}$ |

Примерно за полмиллисекунды до прохождения тока I_2 через нулевое значение от системы управления испытательным стендом подается команда на срабатывание воздушного разрядника F . При его срабатывании происходит разряд батареи $C_{\text{гин}}$ на испытуемую ВДК 3. Возникающий при этом ток I_1 частотой 500 Гц суммируется с током I_2 .

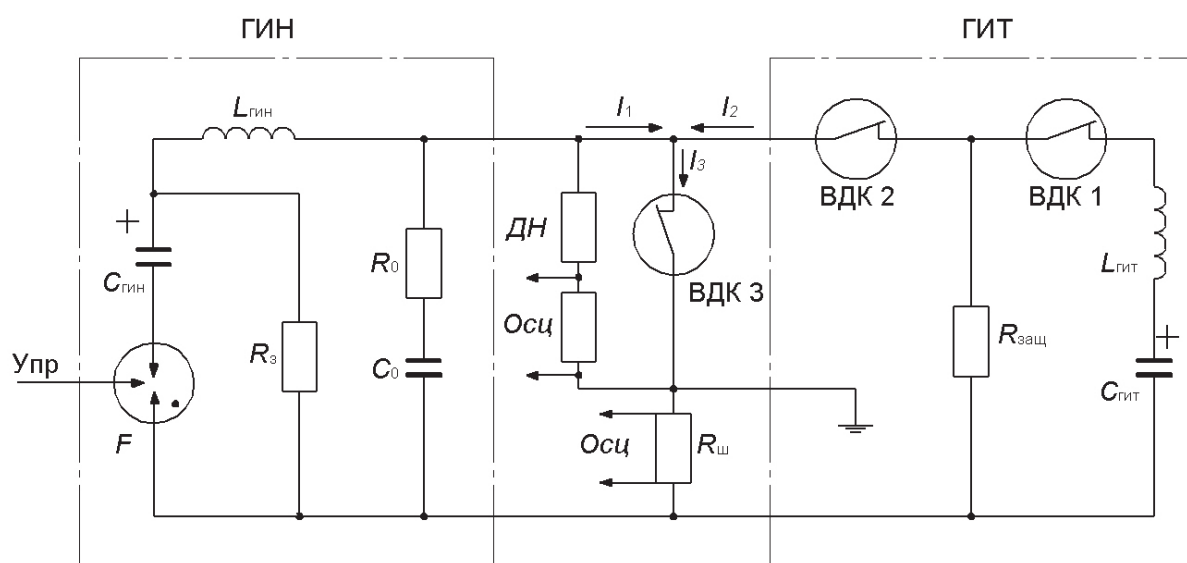


Рис. 2. Принципиальная схема испытательного стенда: $C_{\text{ГИН}}$ и $C_{\text{ГИТ}}$ – конденсаторные батареи; $L_{\text{ГИН}}$ и $L_{\text{ГИТ}}$ – индуктивности контуров; ВДК 1 – коммутационная ВДК; ВДК 2 – защитная ВДК; ВДК 3 – испытуемая ВДК; R_0 и C_0 – резистивный и емкостный элементы схемы формирования ПВН; R_3 – зарядный резистор; F – воздушный высоковольтный управляемый разрядник; I_1 – ток ГИН; I_2 – ток ГИТ; I_3 – ток в испытуемой ВДК; ДН – резистивный делитель напряжения; $R_{\text{защ}}$ – защитный резистор; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление токового шунта

Fig. 2. Schematic diagram of the synthetic test facility: $C_{\text{ГИН}}$ and $C_{\text{ГИТ}}$ are the capacitor banks; $L_{\text{ГИН}}$ and $L_{\text{ГИТ}}$ are the inductances of loops; ВДК 1 is the switching vacuum interrupter; ВДК 2 is the protective vacuum interrupter; ВДК 3 is the test vacuum interrupter; R_0 and C_0 are the resistive and capacitive elements of the transient recovery voltage forming circuit; R_3 is the charging resistor; F is the air-driven high-voltage arrester; I_1 is the PVG current; I_2 is the PCG current; I_3 is the current in the test vacuum interrupter; ДН is the resistive voltage divider; $R_{\text{защ}}$ is the protective resistor; $R_{\text{ш}}$ is the resistance of current shunt

С этого момента через контакты ВДК 3 протекает суммарный ток I_3 , а в электрической дуге защитной ВДК 2 протекает ток, равный разности токов I_2 и I_1 . При уравнивании этих токов происходит гашение дуги и восстановление электрической прочности защитной ВДК 2, тем самым осуществляется гарантированное отключение силовоточного контура ГИТ от испытуемой ВДК 3. Поскольку отключение защитной ВДК 2 происходит раньше перехода тока в испытуемой ВДК 3 через ноль, то, начиная с этого момента и до перехода тока через ноль, через испытуемую ВДК 3 протекает только ток I_1 и все дальнейшие процессы в ней определяются параметрами высоковольтного контура ГИН.

Если скорость восстановления электрической прочности выше, чем скорость ПВН, то наступает следующий этап процесса коммутации – на контактах ВДК 3 появляется возвращающееся напряжение. Если после 0,3 с в ВДК 3 не произошло повторного зажигания дуги, то можно говорить о том, что произошло успешное отключение тока короткого замыкания.

В противном случае происходит повторное зажигание дуги (отказ) [8]. Отказ может произойти как на стадии ПВН, так и на стадии возвращающегося напряжения. В этом случае в течение полупериода в цепи разряда ГИН в противоположном направлении потечёт ток с частотой 500 Гц. В момент очередного перехода тока через ноль происхо-

дит восстановление напряжения на контактах ВДК 3, при этом напряжение имеет противоположную полярность и меньшую амплитуду. Подобные процессы будут повторяться до того момента, пока не восстановится электрическая прочность ВДК 3.

Методика испытаний

На первом этапе испытаний использовался только силовоточный контур ГИТ. Испытанию подверглась ВДК фазы А. Значение напряжения на контактах испытуемой ВДК 3 после гашения дуги определялось собственным ПВН разрядной цепи $U_{\text{ПВН}}$ и остаточным послеразрядным напряжением на конденсаторной батарее. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Во всём диапазоне токов гашение дуги происходит в первый полупериод тока (критерий успешно- го отключения) [20]. Напряжение дуги для 8 из 10 экспериментов варьируется от 30,4 до 34 В для токов в диапазоне 10,1–18,3 кА, т. е. слабо зависит от тока дуги. Анализ форм кривых U_d , говорит об отсутствии анодного пятна, возникновение которого создает высокую вероятности отказа ВДК. ВДК фаз В и С также успешно прошли этот этап испытаний. Исходя из этих предпосылок можно ожидать, что испытуемые ВДК способны отключать токи амплитудой 18,3 кА, что соответствует номинальному отключаемому току 10 кА [21].

Таблица 3. Результаты испытаний ВДК фазы А

Table 3. Results of testing the vacuum interrupter phase A

| $U_{згит}, \text{кВ}$ | $I_{ргит}, \text{кА}$ | $U_d, \text{В}$ | $\Delta t_d, \text{мс}$ | $t, \text{мс}$ | $U_{пвн}, \text{кВ}$ | Результат/Result |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|----------------|----------------------|--|
| 0,45 | 9,4 | 28 | 5,1 | 9,7 | 0,5 | успешное отключение successful breaking |
| 0,50 | 10,1 | 33 | 7,0 | | | |
| 0,55 | 11,2 | 34 | 7,1 | | | |
| 0,60 | 12,5 | 34 | 6,5 | | | |
| 0,65 | 14,4 | 32 | 7,1 | | | |
| 0,70 | 14,6 | 34 | 6,1 | | | |
| 0,75 | 15,8 | 30 | 5,9 | | | |
| 0,80 | 16,9 | 33 | 5,2 | | | |
| 0,85 | 18,3 | 34 | 6,0 | | | |

Примечание: $U_{згит}$ – напряжение заряда конденсаторной батареи ГИТ; $I_{ргит}$ – амплитудное значение тока в цепи разряда ГИТ; U_d – напряжение вакуумной дуги; Δt_d – длительность горения вакуумной дуги; t – длительность полуволны тока разряда; $U_{пвн}$ – переходное восстанавливающее напряжение.

Note: $U_{згит}$ is the charge voltage of PCG capacitor bank; $I_{ргит}$ is the PCG current; U_d is the voltage of vacuum arc; Δt_d is the lifetime of vacuum arc; t is the duration of the half-wave discharge current; $U_{пвн}$ is the transient recovery voltage.

На втором этапе испытаний к силовоточному контуру ГИТ был добавлен высоковольтный контур ГИН, т. е. была в полной мере реализована схема синтетических испытаний [9]. Результаты второго этапа испытаний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты испытаний ВВ

Table 4. Results of testing the vacuum interrupter

| $U_{згит}, \text{кВ}$ | $U_{згин}, \text{кВ}$ | $I_{ргит}, \text{кА}$ | $U_{пвн}, \text{кВ}$ | Полупериод отключения Half the period of disconnecting | Результат Result |
|---|-----------------------|-----------------------|----------------------|---|--------------------------------|
| Испытание ВДК фазы А/Testing the vacuum interrupter phase A | | | | | |
| 0,41 | 10 | 7,5 | 10 | второй second | нет отклю- чения failure |
| 0,70 | 13 | 13,2 | 17 | | |
| 0,73 | 14 | 15,2 | 15 | | |
| 0,74 | 13 | 15,9 | 10 | | |
| 0,75 | 14 | 15,4 | 12 | четвертый/fourth | |
| Испытание ВДК фазы В/Testing the vacuum interrupter phase B | | | | | |
| 0,51 | 13 | 11,5 | 16 | второй second | нет отклю- чения failure |
| 0,54 | | 11,5 | 17 | | |
| 0,55 | | 12,3 | 15 | | |
| 0,73 | | 16,0 | 14 | | |
| 0,74 | 14 | 16,0 | 13 | | |
| Испытание ВДК фазы С/Testing the vacuum interrupter phase C | | | | | |
| 0,28 | 13 | 5,3 | 8 | четвертый/fourth | нет отклю- чения failure |
| 0,53 | 11 | 7,8 | 12 | второй second | |
| 0,72 | 13 | 16,0 | 15 | | |
| 0,74 | 14 | 15,6 | 13 | | |
| 0,75 | | 16,2 | 14 | | |

Примечание: $U_{згин}$ – напряжение заряда конденсаторной батареи ГИН.

Note: $U_{згин}$ is the charge voltage of PVG capacitor bank.

Отсутствие успешных отключений для ВДК всех фаз ВВ указывает на ошибочность первоначальной оценки номинальных параметров испытуемых камер.

На отключающую способность ВДК влияет совокупность таких параметров, как напряжение, ток, габариты ВДК, расстояние между контактами ВДК при отключении, «вылет» контактов, скорость разведения контактов, материал контактов, качество вакуумно-термической обработки [8, 15]. Из всех перечисленных параметров наиболее доступными для оперативного регулирования в ходе испытаний являются величины коммутируемых токов и напряжений.

Во время синтетических испытаний ГИН и ГИТ являлись униполярными источниками питания. Подвижный и неподвижный контакты ВДК на протяжении всего периода испытаний имеют неизменную полярность. Как известно, дуговая эрозия анода и катода в дуговом разряде неодинакова, что может при длительных испытаниях создать несимметричные изменения контактно-экранной системы ВДК, в свою очередь ведущие к несимметричным условиям горения и гашения вакуумного разряда. И наоборот, если ВДК имеет несимметричную внутреннюю конструкцию, то условия гашения и инициирования электрического пробоя на аноде и катоде неодинаковы. Исходя из этих соображений, на третьем этапе испытаний был проведен эксперимент по определению отключающей способности ВДК при смене полярности (табл. 5) контактов фазы А.

Таблица 5. Результаты испытаний ВДК фазы А ВВ при смене полярности контактов

Table 5. Results of testing the vacuum interrupter phase A with contacts changing

| $U_{згит}, \text{кВ}$ | $U_{згин}, \text{кВ}$ | $I_r, \text{кА}$ | $U_{пвн}, \text{кВ}$ | Результат/Result |
|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|--|
| 0,71 | 15 | 13,8 | 11,0 | нет отключения failure |
| 0,71 | 15 | 14,2 | 12,1 | |
| 0,72 | 14 | 15,1 | 11,7 | |
| 0,72 | 14 | 15,1 | 15,0 | |
| 0,72 | 14 | 14,7 | 11,7 | успешное отключение successful breaking |

Как видно из табл. 5, смена полярности не позволила существенно изменить сложившуюся тенденцию, обеспечив лишь одно успешное срабатывание в пяти проведенных экспериментах.

Анализ осциллограмм второго этапа испытаний позволил сделать вывод о том, что в большинстве опытов ВДК не отключают токи короткого замыкания при наложении ПВН, но отключают токи ПВН на втором и третьем полупериоде. В моменты отключения после отказов величина ПВН варьируется в диапазоне 9–13 кВ. При последовательном соединении ВДК такой уровень ПВН можно прикладывать, не меняя номинальный ток отключения и не перестраивая ГИН.

Схема эксперимента при последовательном соединении двух ВДК, реализованная на четвертом этапе испытаний, представлена на рис. 3. ВДК 3, 5 испытуемого выключателя ИВ соединены после-

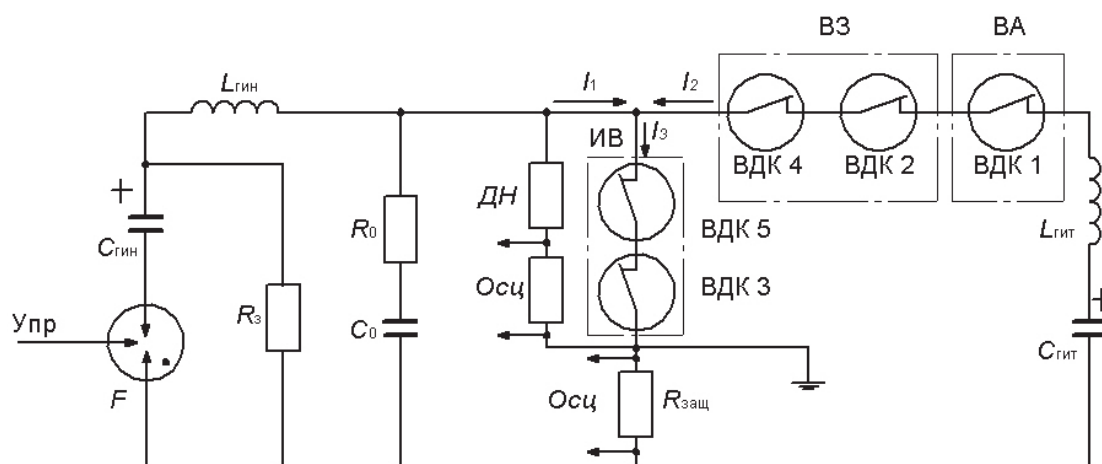


Рис. 3. Схема соединений элементов при испытании двух последовательно соединённых ВДК

Fig. 3. Circuit of the elements connection when testing two series-connected vacuum interrupters

довательно. В качестве коммутирующего элемента ВА использована ВДК 1 синхронного выключателя. В качестве защитного выключателя ВЗ используются две последовательно соединённые камеры: ВДК 2 испытуемого выключателя и ВДК 4 синхронного выключателя. Как показали испытания (табл. 6), эта схема позволяет достичь успешного отключения токов КЗ величиной 16 кА в первый полупериод тока, что соответствует номинальному напряжению ВВ класса 10 кВ [21].

Таблица 6. Результаты испытаний двух последовательно соединённых ВДК ВВ

Table 6. Results of testing two series-connected vacuum interrupters

| $U_{згит}, \text{кВ}$ | $U_{зпит}, \text{кВ}$ | $I_p, \text{кА}$ | $U_{пвн}, \text{кВ}$ | Результат/Result |
|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|--|
| 0,73 | 13 | 16,0 | 11,8 | успешное отключение successful breaking |
| 0,73 | 14 | 16,0 | 13,3 | |
| 0,73 | 15 | 16,0 | 12,0 | |
| 0,73 | 15 | 15,5 | 15,0 | |
| 0,74 | 14 | 14,0 | 13,0 | |

После завершения исследований по отключению номинальных токов были проведены эксперименты по отключению токов в диапазоне 3–5 кА при амплитуде напряжения ПВН 20 кВ и скорости восстановления напряжения 0,17 кВ/мкс. Исследовались ВДК всех трёх фаз. В общей сложности проведено 20 испытаний. Успешных отключений не зафиксировано.

Результаты испытаний

После завершения испытаний, вакуумный выключатель типа ВВТ-10–20 находится в рабочем состоянии. Видимых повреждений нет. Все электроизоляционные и электромеханические характеристики в норме. Исключение составляет ВДК фазы А, переходное сопротивление контактов которой резко отличается от переходных сопротивле-

ний прочих фаз (переходное сопротивление контактов фазы А – 257 мкОм, фаз В и С – 63 и 67 мкОм соответственно). Предположительная причина – повышенный износ контактов ВДК, вследствие большего, по сравнению с другими фазами, числа предварительных испытаний на высоких токах отключения, и ослабление силы поджатия контактов. Кроме того, ВДК фазы А эпизодически использовалась в качестве защитной ВДК. Для окончательного выявления обозначенной причины планируется дополнительная ревизия ВВТ-10–20.

После вскрытия одной из прошедших испытаний камер, было установлено, что эрозии подверглась лишь часть поверхности контактов ВДК. Без проведения дополнительных исследований не представляется возможным выяснить причину этого явления, но уже сейчас можно выдвинуть предположение о том, что конфигурация магнитного поля, создаваемого в исследованных ВДК способствует переходу электрической дуги в контрагированное состояние, что крайне неблагоприятно отражается на коммутационном ресурсе ВДК. Основываясь на данных, полученных в ходе испытаний, можно дать некоторые рекомендации, способные обеспечить наиболее оптимальный режим работы ВДК в опытах отключения, а именно:

- 1) уменьшить ход контактов до минимально допустимого;
- 2) снизить «вылет» контактов ВДК при отключении за счет дополнительной регулировки буфера отключения;
- 3) максимально увеличить скорость контактов ВДК при отключении.

Заключение

Синтетические испытания показали, что исследованные экспериментальные ВДК в составе вакуумного выключателя типа ВВТ-10–20 успешно отключают ток до 18,3 кА при ПВН 0,85 кВ (табл. 3). Изначальное предположение о том, что

испытываемый ВВ, содержащий по одной экспериментальной ВДК в каждом из своих полюсов, способен к работе в сетях напряжения классом 10 кВ, оказалось неверным. Количество отказов в коммутации для дугогасительных камер всех фаз ВВ (табл. 5) свидетельствует о том, что конструкция

контактно-экранной системы испытываемой ВДК не обеспечивает отключения номинальных токов 10 кА. Показано, что последовательное включение двух ВДК в каждом из полюсов ВВ позволяет отключать токи 10 кА при ПВН, характерном для выключателей класса напряжения 10 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сибикин Ю.Д. Электроснабжение предприятий добычи и переработки нефти и газа. – М.: Форум, 2014. – 352 с.
2. Сибикин Ю.Д. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности. Оборудование систем электроснабжения. – М.: ИП РадиоСофт, 2015. – 352 с.
3. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems / R. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanovic, D. Peelo, A. Janssen. – New York: John Wiley & Sons, 2014. – 440 p.
4. Набатов К.А., Афонин В.В. Высоковольтные вакуумные выключатели распределительных устройств. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2010. – 96 с.
5. Афонин В.В., Набатов К.А. Элегазовые выключатели распределительных устройств высокого напряжения. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 96 с.
6. Garzon D.R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. – New York, Basel: Marcel Dekker, Inc, 2002. – 425 p.
7. Дьяков А.В. Элегазовые выключатели не выдержали низких температур // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 2. – С. 25–29.
8. Slade P. The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 510 p.
9. Каплан В.В., Нашатырь В.М. Синтетические испытания высоковольтных выключателей. – Л.: Энергия, 1980. – 200 с.
10. Arc Behaviors in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Fields Electrodes / W. Zhongyi, Z. Yuesheng, L. Zhiyuan, C. Shaoyong // Plasma science and technology. – 2007. – V. 5. – № 5. – P. 570–574.
11. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of High-current Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – Mumbai, 2014. – P. 157–160.
12. Забелло К.К. Исследование влияния магнитных полей различной ориентации на характеристики катодного пятна вакуумной дуги и генерируемой пятном плазменной струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – СПб., 2015. – 128 с.
13. Greenwood A. Vacuum switchgear. – London: IEE Press, 1994. – 253 p.
14. Перцев А.А., Рыльская Л.А. Вакуумные дугогасительные камеры // Сборник статей сотрудников ВЭИ. – Рязань: Рязанский издательский дом, 2008. – С. 148–165.
15. Slade P. Electrical Contacts: Principles and Applications. Second Edition. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 1237 p.
16. Lafferty J. Vacuum Arcs: Theory and Application. – New York: John Wiley & Sons, 1980. – 378 p.
17. Schade E. Physics of High-Current Interruption of Vacuum // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2005. – V. 33. – № 5. – P. 1564–1575.
18. Tsukima M., Abe J., Koga H. Temperature Analysis on Contact Surface after High-Current Diffuse Vacuum Arc // International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – Mumbai, 2014. – V. 134. – № 11. – P. 930–935.
19. High-Current Vacuum Arc Shunted by a Semiconductor Switch on Kiloampere Current Interruption / A.V. Schneider, S.A. Popov, A.V. Batrakov, V.A. Lavrinovich // IEEE Transaction on Plasma Science. – 2016. – V. 44. – № 7. – P. 1235–1240.
20. Лавринович В.А., Лопатин В.В., Перепелкин С.Н. Синтетические испытания вакуумных выключателей // Промышленная энергетика. – 2005. – № 2. – С. 19–22.
21. ГОСТ Р 52565–2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. Общие технические условия. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2007. – 91 с.

Поступила 06.09.2016 г.

Информация об авторах

Лавринович В.А., доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Убиенных Б.И., кандидат технических наук, консультант кафедры электроэнергетических систем Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Кладько А.А., аспирант кафедры высоковольтной электрофизики и сильноточной электроники Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.316.542.9

SWITCHING TESTS OF AN EXPERIMENTAL VACUUM CIRCUIT BREAKER

Valeriy A. Lavrinovich¹,
lavrhome@mail.ru

Boris I. Ubiennykh¹,
boinnu@rambler.ru.

Andrey A. Kladko¹,
lavrhome@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the work is caused by the active ongoing technical re-equipment of electric networks medium voltage at oil and gas enterprises of the Russian Federation. High operational reliability, environmental friendliness and ease of maintenance make the vacuum circuit breaker the most preferred switchgear for industrial conditions inherent in the mining industry enterprises. Like any other industrial equipment, the vacuum circuit breaker must meet certain characteristics, controlled both during the pre-operational testing and at operation. In this regard, the preliminary tests on the prototypes of the switching capacity of the vacuum switches during their design are not only relevant but necessary task.

The main aim of the study is the experimental determination of the switching characteristics of the vacuum interrupters as a part of the high-voltage vacuum circuit breaker with a rated voltage of 10 kV.

The methods. To determine the switching characteristics of the investigated high-voltage vacuum circuit breaker the authors have applied the synthetic test circuit by Vale–Dobker, forming on the test object the fault current in the range from 1 to 10 kA and transient recovery voltage across the contacts of the vacuum chamber up to 20 kV.

The results. The authors studied the breaking capacity of the experimental vacuum interrupters as a part of the vacuum circuit breaker for fault current range of 1...10 kA. It was determined that the experimental vacuum interrupters successfully switch off the current to 18,3 kA at transitional recovery voltage of 0,85 kV, but they are not suitable for switching networks with rated breaking current of 10 kA at transitional recovery voltage characteristic of the voltage class switches of 10 kV. It is shown that series connection of two vacuum interrupters in each pole of the vacuum circuit breaker is necessary for applying the experimental vacuum interrupters in the networks of 10 kV voltage class.

Key words:

Vacuum circuit breaker, switching characteristics, synthetic scheme, vacuum interrupter, tests.

REFERENCES

1. Sibikin Yu.D. *Elektrosnabzhenie predpriyatiy dobychi i pererabotki nefiti i gaza* [Power supply of oil and gas mining and processing enterprises]. Moscow, Forum Publ., 2014. 352 p.
2. Sibikin Yu.D. *Elektrooborydovanie neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Oborudovanie sistem elektrosnabzheniya* [Electrical equipment of oil and gas industry. Power systems equipment]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2015. 352 p.
3. Smeets R. *Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems*. New York, John Wiley & Sons Publ., 2014. 440 p.
4. Nabatov K.A., Afonin V.V. *Vysokovoltnye vyklyuchateli raspredelitelnykh ustroystv* [High-voltage vacuum circuit breakers of switchgear]. Tambov, TGTU Publ., 2010. 96 p.
5. Afonin V.V., Nabatov K.A. *Elegazovye vyklyuchateli raspredelitelnykh ustroystv vysokogo naprayzheniya* [Gas-insulated circuit breakers of high-voltage distribution devices]. Tambov, TGTU Publ., 2009. 96 p.
6. Garzon D.R. *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*. New York, Basel, Marcel Dekker, Inc Publ., 2002. 425 p.
7. Dyakov A.V. Elegazovye vyklyuchateli ne vyderzhali nizkikh temperature [SF 6 circuit-breakers did not undergo high temperatures]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2011, no. 2, pp. 25–29.
8. Slade P. *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2008. 510 p.
9. Kaplan V.V., Nashatyr V.M. *Sinteticheskie ispytaniya vysokovoltnykh vyklyuchateley* [Synthetic testing of high-voltage circuit breakers]. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 200 p.
10. Zhongyi W., Yuesheng Z., Zhiyuan L., Shaoyong C. Arc Behaviors in Vacuum Interrupters with Axial Magnetic Fields Electrodes. *Plasma science and technology*, 2007, vol. 5, no. 5, pp. 570–574.
11. Agarwal M.S., Goswami P.K. Study of High-Current Vacuum Arcs in Axial Magnetic Fields. *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Mumbai, 2014. pp. 157–160.
12. Zabello K.K. *Issledovanie vliyaniya magnitnykh poley razlichnoy orientatsii na kharakteristiki katodnogo pyatna vakuumnoy dugi i generiruyemoy pyatnom plazmennoy strui. Dis. Kand. nauk* [Investigation of influence of magnetic fields of different orientation on characteristics of a cathode spot of a vacuum arc and spot-generated plasma jet]. Saint Petersburg, 2015. 128 p.
13. Greenwood A. *Vacuum switchgear*. London, IEE Press Publ., 1994. 253 p.
14. Pertsev A.A. *Vakuumnye dugogasilnye kamery* [Vacuum interrupters]. *Sbornik statey sotrudnikov VEI* [Collection of articles of the VEI employees]. Ryazan, Ryazan Publ. house, 2008, pp. 148–165.
15. Slade P. *Electrical Contacts: Principles and Applications*. Second Edition. Boca Raton, CRC Press Publ., 2013. 1237 p.
16. Lafferty J. *Vacuum Arcs: Theory and Application*. New York, John Wiley & Sons Publ., 1980. 378 p.
17. Schade E. Physics of High-Current Interruption of Vacuum. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, vol. 33, no. 5, pp. 1564–1575.
18. Tsukima M., Abe J., Koga H. Temperature Analysis on Contact Surface after High-Current Diffuse Vacuum Arc. *International*

- Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*. Mumbai, 2014. Vol. 134, no. 11, pp. 930–935.
19. Schneider A.V., Popov S.A., Batrakov A.V., Lavrinovich V.A. High-Current Vacuum Arc Shunted by a Semiconductor Switch on Kiloampere Current Interruption. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2016, vol. 44, no. 7, pp. 1235–1240.
20. Lavrinovich V.A., Lopatin V.V., Perepelkin S.N. Sinteticheskie ispytaniya vakuumnykh vyklyuchateley [Synthetic Tests of Vacuum Circuit Breakers]. *Promyshlennaya energetika*, 2005, no. 2, pp. 19–22.
21. GOST R 52565–2006. Vyklyuchateli peremennogo toka na napryazheniya ot 3 do 750 kV. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard R 52565–2006. AC switches for voltages from 3 to 750 kV. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 91 p.

Received: 6 September 2016.

Information about the authors

Valeriy A. Lavrinovich, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Boris I. Ubiennykh, Cand. Sc., counselor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey A. Kladko, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.